中国生态农业学报 2017 年 10 月 第 25 卷 第 10 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Oct. 2017, 25(10): 1413−1422

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170150

吴东星, 李国栋, 张茜. 华北平原典型冬小麦农田生态系统能量平衡与闭合研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(10): 1413−1422
Wu D X, Li G D, Zhang X. Energy balance and closure of typical winter wheat farmland ecosystem in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(10): 1413−1422

华北平原典型冬小麦农田生态系统能量平衡与闭合研究*

吴东星[1], 李国栋[1,2**], 张 茜[1]

(1. 河南大学环境与规划学院 开封 475004; 2. 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室 开封 475004)

摘 要: 准确量化分析地气之间的物质和能量交换对于水资源管理和农业可持续发展是十分重要的。能量平衡闭合是评估观测数据准确性和分析地表能量平衡的一个重要的评价指数。本研究利用开路涡度相关系统和全要素自动气象站对华北平原典型冬小麦农田生态系统 2013—2014 年度的能量通量及常规气象要素进行了连续观测, 分析了冬小麦农田各能量通量的日变化和年变化特征, 计算冬小麦在 4 个生育时期(出苗期、越冬期、拔节期和灌浆期)的能量闭合和波文比。结果表明: 在日尺度上, 选取的 4 个生育时期净辐射和各能量分量的日变化趋势均为单峰二次曲线, 净辐射、显热通量和潜热通量的峰值出现在 12:00—13:00, 土壤热通量的峰值出现在 14:00—15:00。在年尺度上, 净辐射和潜热通量的变化趋势较为一致, 均在越冬期达到最低值 114.51 W·m^{-2} 和 13.47 W·m^{-2}, 而在灌浆期达到最大值 327.02 W·m^{-2} 和 116.56 W·m^{-2}。选取的 4 个生育时期的代表性观测日期能量闭合良好, 能量闭合率分别为 0.49、0.77、0.81 和 0.76。4 个生育时期内波文比值日变化趋势均呈倒“U”型, 出苗期波文比在 14:00 达到最大值 2.12; 越冬期、拔节期和灌浆期在 10:00 左右达到最大值, 分别为 1.48、0.31 和 0.58。本文的定量化结果可为华北平原农田生态系统水热通量等研究提供依据。

关键词: 冬小麦; 农田生态系统; 能量平衡特征; 涡度相关系统; 能量闭合率; 华北平原
中图分类号: S161.2+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)10-1413-10

Energy balance and closure of typical winter wheat farmland ecosystem in the North China Plain*

WU Dongxing[1], LI Guodong[1,2**], ZHANG Xi[1]

(1. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Kaifeng 475004, China)

Abstract: The accurate quantification of energy and mass exchange between terrestrial ecosystem and the atmosphere is important for water resources management and sustainable agricultural development. Energy balance closure is also a vital index

* 国家自然科学基金项目(U1404401)、河南省高校科技创新团队支持计划项目(161RTSTHN012)、河南省高等学校青年骨干教师资助计划(2013GGJS-030)、河南大学资源与环境研究所项目(HD-ZHS-201403)和河南大学新兴交叉及特色学科培育项目(XXJC20140003)资助
** 通讯作者: 李国栋, 研究方向为陆面过程。E-mail: liguodonghd@163.com
吴东星, 研究方向为生态气候学。E-mail: ecologywdx@163.com
收稿日期: 2017-02-22 接受日期: 2017-07-18

* The study was funded by the National Natural Science Foundation of China (U1404401), Henan Province University Scientific and Technological Innovation Team Support Project (161RTSTHN012), the Foundation of Henan Provincial Youth Backbone Teachers (2013GGJS-030), the Project of Henan University Resource and Environment Research Institute (HD-ZHS-201403) and the New Interdisciplinary and Characteristic Subject Cultivation Project of Henan University (XXJC20140003).
** Corresponding author, E-mail: liguodonghd@163.com
Received Feb. 22, 2017; accepted Jul. 18, 2017

for assessing the accuracy of measurements data and analyzing surface energy balance. In order to evaluate energy balance and energy closure in farmland ecosystems, the open eddy covariance system and total factor automatic weather station were used to observe continuous surface energy flux and conventional meteorological elements of typical winter wheat in farmland ecosystems in the North China Plain for the period 2013–2014. In the study, four typical growth stages (seeding, overwintering, jointing and grain-filling stages) were investigated for diurnal and annual variations in energy flux of winter wheat. Also the diurnal variations in Bowen ratio for four typical growth stages were calculated. The results showed that the trends in diurnal variations in net radiation and energy component of the four growing stages of winter wheat were unimodal in shape. The peak values of net radiation, sensible heat flux and latent heat flux were observed between 12:00 and 13:00. The maximum value of sensible heat flux was at 11:30 and the peak value of soil heat flux occurred between 14:00 and 15:00; which was about 1.00 hour later than sensible heat flux and latent heat flux. For annual variation, the trends in net radiation and latent heat flux were strongly consistent. The minimum values of net radiation and latent heat flux at overwintering stage were 114.51 $W \cdot m^{-2}$ and 13.47 $W \cdot m^{-2}$, respectively. However, sensible heat flux at overwintering stage was relatively higher than latent heat flux. Sensible heat flux and soil heat flux were respectively 33.61 $W \cdot m^{-2}$ and 13.05 $W \cdot m^{-2}$. The maximum values of net radiation and latent heat flux were observed at grain-filling stage, with respective values of 327.02 $W \cdot m^{-2}$ and 116.56 $W \cdot m^{-2}$. After winter wheat harvest, sensible heat flux increased rapidly, while latent heat flux rapidly decreased. Energy closures of representative observation dates selected for the four growing stages were also good. The energy closure ratios were 0.49, 0.77, 0.81 and 0.76, respectively. The energy closure ratio was high in summer and relatively low in winter. Diurnal variations in Bowen ratio during the four growing stages had an inverted U-type curve. While Bowen ratio values for daytime were relatively stable, those for nighttime were negative and relatively unstable. The Bowen ratio curves agreed well with sensible heat flux curve. Bowen ratio was positive when sensible heat flux was positive and it increased with sensible heat flux. The maximum value of Bowen ratio at seeding stage (2.12) occurred at 14:00, while the maximum values of Bowen ratio at overwintering (1.48), jointing (0.31) and grain-filling stages (0.58) all occurred at 10:00. The results of the study set the basis for research on heat and water vapor fluxes in farmland ecosystems in the North China Plain.
Keywords: Winter wheat; Farmland ecosystem; Energy balance characteristics; Eddy covariance system; Energy closure ratio; North China Plain

地-气之间进行的物理、化学和生物过程及相互作用对全球气候变化、生物多样性和环境变化有重要影响[1]。地表能量通量直接影响生态系统内温度、水分传输、植被发育和生态系统生产力[2]，也是生态水文模型的重要输入参数[3-4]。涡度相关技术是直接观测下垫面与大气之间水热通量和 CO_2 通量的微气象技术，具有理论论证完善、观测精度高和连续稳定等优点[5]，已逐渐成为地-气间能量和物质通量观测的标准方法[6]，被应用在各种生态系统中做了大量研究[7-9]，在陆地生态系统水、碳循环的关键过程及其对各种因素的响应、生态系统能量与通量的模型模拟等方面取得了较大进展[10-12]。

农田生态系统是人类社会存在和发展的基础，对农田生态系统的研究有助于科学认识农田生态系统的功能，合理开发利用农业资源，有效管理农田生态系统，且农业活动已成为影响全球变暖和全球水热循环的关键因素，因此需要得到国际上的广泛关注[13]。目前关于农田与大气之间物质和能量的研究集中在水热交换机制[14-15]、作物和土壤的碳储量的变化[16-17]、农田生态系统通量贡献区分析[18]和影响农田生态系统水热过程交换的因素[19]。以农田下垫面为主的 KUREX-91 通量试验中，能量平衡闭合率为 0.67[20-21]；王介民等[22]对阿柔冻融观测站进行研究发现，土壤浅层热储量的存在是能量不闭合的主要原因；徐自为等[23]通过多种方法测算土壤热通量并分析其对能量闭合的影响。Wilson 等[24]和李正泉等[25]分别对 FLUXNET 和 ChinaFLUX 能量平衡日变化情况进行了研究，发现夜间的不闭合程度比白天更加明显。目前，能量平衡闭合的研究更多地突出能量各分量的误差计算，而在不同的时间尺度上能量平衡的特征分析相对较少。通过对冬小麦农田不同时间尺度上的能量平衡分析，有利于增强对农田生态系统能量平衡机理及转化规律的全面认识。

本研究对 2013 年 10 月—2014 年 6 月华北平原典型冬小麦农田生态系统的能量通量进行观测分析，并结合当年气象站观测资料，研究了冬小麦农田生态系统各生育时期能量平衡特点，阐明冬小麦各生育时期能量通量的变化特征，计算了各生育时期能量闭合率以及波文比，从站点尺度论述冬小麦农田生态系统能量分配特点。本研究观测数据和计算结果可为华北平原典型冬小麦农田生态系统生产力和水分利用效率等相关研究提供科学依据，也为该地

区水、热和 CO_2 通量的研究提供基础数据和方法。

1　研究区域及研究方法

1.1　研究区概况

华北平原冬小麦的种植历史悠久, 且种植区域连续、种植面积较大。本试验在中国科学院封丘农业生态实验站(简称中科院封丘实验站)进行。该站是国家和中国科学院部署在华北平原从事农业、资源、生态和环境研究的一个最主要的野外试验基地, 为中国生态系统研究网络(CERN)重点站、国家重点野外科学观测实验站。封丘县属于半干旱、半湿润的暖温带大陆性季风气候, 年平均气温 14.2 ℃, 年均降水量为 605 mm, 年蒸发量为 1 875 mm, 无霜期为 214 d, 光热资源丰富。封丘县整体地势平坦, 海拔高度 67 m, 东、南面相邻黄河, 水资源较为充足。南部受黄河侧渗影响形成背河洼地, 北部与华北平原腹地相连。土壤主要为黄河沉积物发育的黄潮土, 主要植被为次生的乔灌草植物, 主要种植制度为小麦-玉米一年两熟制[26]。旱涝、盐碱和风沙是影响当地农作物的主要因素, 本研究自 2013 年 10 月 23 日冬小麦播种开始观测, 到 2014 年 6 月 5 日收获时结束, 进行为期 9 个月的连续田间试验观测。

1.2　观测试验与研究方法

1.2.1　涡度相关系统观测试验

中科院封丘实验站试验田为典型的农田生态系统, 下垫面为地势平坦的大片农田, 田间土质均匀, 种植结构单一, 符合试验对盛行风向的风浪区长度的要求。开路式涡度系统由 WindMaster Pro 型三维超声风速仪(英国 Gill 公司, 风速范围 0~0.65 $m\cdot s^{-1}$, 风速精度<1.5% RMS @ 12 $m\cdot s^{-1}$, 分辨率 0.01 $m\cdot s^{-1}$)和 LI-7500A 型 CO_2/H_2O 快速响应红外气体分析仪(美国 LI-COR 公司, CO_2 校准范围 0~3 000 $\mu mol\cdot mol^{-1}$, H_2O 校准范围 0~60 $mmol\cdot mol^{-1}$)组成, 可自动测量并存储地表与大气相互作用时近地气层的瞬时三维风速脉动、温度脉动、H_2O 脉动和 CO_2 脉动, 并计算出地气之间的显热通量(H)和潜热通量(LE)。原始数据的采样频率为 10 Hz, 每 30 min 输出一组平均值。涡度相关系统的架设高度为 4.45 m。

1.2.2　全要素常规气象观测试验

中科院封丘实验站内的全要素气象观测系统对田间环境要素进行长期观测。全要素气象观测系统包括: DYNAMET 型空气温度/相对湿度传感器(距地面 100 cm 和 300 cm 两层); DYNAMET 型风速/风向传感器; DYNAMET 型降雨量传感器; DYNAMET 型太阳总辐射传感器; NR01-05 型四分量净辐射仪; TM-L20 土壤温度传感器(测定深度: 10 cm、20 cm、30 cm); EC-5 型土壤水分传感器(测定深度: 10 cm、20 cm、30 cm); HFP01-10 型土壤热通量传感器, 安装在观测塔的东、西、北面。上述传感器均与 CR1000 型数据采集器(美国 Campbell 公司)相连, 每 30 min 输出一组数据。

1.2.3　数据预处理

由于受到不利天气因素、人为因素和机器故障等影响, 采集的数据会出现一定的异常值。因此, 需要对涡度相关系统观测的数据进行质量分析和修正, 处理后的数据进行下一步的分析研究。数据处理过程包括: 野点去除、二次坐标旋转修正、密度校正(WPL)和超声虚温修正等。经过处理后的数据进行严格的质量控制, 剔除异常数据的标准为: 1)某一观测数据明显大于相邻数据平均值的 5 倍。2)出现降雨时的数据。3)夜间湍流不明显, 此时摩擦风速 $u*$ 较小, 剔除摩擦风速 $u*<0.15\ m\cdot s^{-1}$ 的值。对缺失和剔除的通量值进行插补时, 出现短时连续缺失(缺失 1 d 以内)的数据采用线性插补法, 或用相邻日期类似天气状况的数据进行插补。而对于持续出现恶劣天气或仪器设备故障时(超过 1 d)的数据, 则根据平均日变化法进行插补[27-28]。

1.2.4　能量闭合状况的评价方法

根据热力学第一定律, 地表能量平衡方程可表述为:

$$\mathrm{LE} + H = R_n - G - S - Q \tag{1}$$

式中: LE 为潜热通量; H 为显热通量; R_n 为净辐射; G 为土壤热通量; S 为冠层热储能, 植被储热通量一般不超过净辐射的 5%; Q 为其他来源的能量总和, 对于农田生态系统在观测精度允许的范围内可直接忽略。因而式(1)可改写为:

$$\mathrm{LE} + H = R_n - G \tag{2}$$

式(2)的左端为标准湍流通量, 右端则为可利用能量。在一定观测时间内, 将湍流通量与有效能量相除可求出能量闭合率(EBR), 能量平衡比率为目前研究最常采用的分析能量闭合度的方法, 即:

$$\mathrm{EBR} = \frac{\sum(\mathrm{LE} + H)}{\sum(R_n - G)} \tag{3}$$

在理想状态下忽略冠层热储能, 可利用能量与标准湍流通量较为接近, EBR 的数值越大说明涡度相关系统观测的湍流通量数值精确。造成涡度相关系统观测数据不闭合的原因有很多, 如测量空间尺度不匹配、极端天气的影响和仪器系统误差等[21]。

1.2.5 波文比-能量平衡法

波文比-能量平衡法(BREB)表示为某一界面上显热通量和潜热通量的比值(β)，用公式表示为:

$$\beta = \frac{H}{\mathrm{LE}} = \frac{\rho_\alpha C_\mathrm{p} K_\mathrm{h} \dfrac{\Delta\theta}{\Delta Z}}{\rho_\alpha L K_\mathrm{w} \dfrac{\Delta q}{\Delta Z}} \tag{4}$$

式中: K_h和K_w分别表示热量和水汽的湍流交换系数，$\Delta\theta$ 和 Δq 分别表示两个观测高度的位温和湿度差，ΔZ 表示为观测高度差，ρ_α为空气密度(kg·m^{-3})，C_p为空气比热(1.004 kJ·kg^{-1}·K^{-1})，L 为汽化潜热(2 505.4 kJ·kg^{-1})。由莫宁-奥布霍夫相似理论，热量和水汽的湍流交换系数相等(K_h=K_w)可得:

$$\beta = \frac{C_\mathrm{p}}{L}\cdot\frac{\Delta\theta}{\Delta q} = \gamma\frac{\Delta T}{\Delta e} \tag{5}$$

式中: $\gamma = \dfrac{C_\mathrm{p} P}{\varepsilon L} = 0.65\times10^{-3} P$，表示干湿表常数；$P$ 为大气实际气压(hPa)；$\varepsilon = 0.622$，表示为水汽分子对空气分子的重量比；本研究中用实测温度差 ΔT 代替位温差 $\Delta\theta$，Δe 为两个不同观测高度上的水汽压差(hPa)。

波文比法的计算精度主要取决于 β 值。而在日出和日落，R_n–G 接近于 0 的时间段，或者出现降水时，温度梯度和水汽压梯度方向相反，β 值接近于–1，此时数据误差较大[29]。基于 Perez 等[30]的研究方法，综合考虑波文比仪器测量精度和测点水汽压梯度差等因素，波文比异常值的确定范围如下:

$$-1-\left|\frac{0.019}{\Delta e}\right| < \beta < -1+\left|\frac{0.019}{\Delta e}\right| \tag{6}$$

式中: Δe 为两个不同观测高度上的水汽压差(hPa)。

2 结果与分析

2.1 冬小麦农田生态系统能量通量动态

2.1.1 能量通量日变化特征

在太阳辐射能量的驱动下，农田生态系统内进行能量流动、物质合成转移和碳水循环等生态系统过程。而由于各生态系统下垫面类型的不同和群落结构异质性，导致作物蒸发散和热传导能力的差异。因此，在净辐射进入生态系统后，各能量通量在系统内的分配变化各有差异[31]。在冬小麦 4 个生育时期内(出苗期、越冬期、拔节期和灌浆期)选取晴朗的日子作为代表性时间段，通过对通量数据进行对比分析，研究该生育时期能量通量变化趋势。

由图 1 可看出，4 个生育时期典型日期的通量日变化趋势均呈单峰二次曲线，能量分量均以净辐射能量为基础，而净辐射与日照时数和日照强度有相关关系。出苗期净辐射从 8:00 开始变为正值，12:00 达到最大值 330.92 W·m^{-2}，16:30 以后变为负值。越冬期净辐射从 9:00 开始变为正值，12:30 达到最大值 259.32 W·m^{-2}，16:30 以后变为负值。拔节期从 7:30 净辐射为正值开始，到 12:30 达到最大值 559.26 W·m^{-2}，18:00 以后变为负值。灌浆期 5:30 净辐射为正值，此时太阳接近北回归线，日出时间为 4 个生育期内最早的，13:00 达到最大值 702.22 W·m^{-2}。因此可以看出，4 个生育期内净辐射最大值出现在灌浆期，最小值在越冬期，且出现时间一般在 12:00—13:00。

潜热通量(LE)的日变化趋势和净辐射 R_n 基本一致，呈单峰二次曲线。显热通量(H)的变化趋势和 LE 刚好相反，随着冬小麦的生长发育，冠层覆盖度也随之增大，LE 增大，而 H 变小。由图 1 可以看出，出苗期 10:00 之前，LE 大于 H，而在 10:00 之后和 16:00 之前，LE 小于 H。分析认为冬小麦出苗期冠层覆盖度较小，作物蒸腾作用较弱，白天冬小麦吸收净辐射能量主要用来地-气间热交换。越冬期和出苗期结果相似，在 10:00 以后 H 大于 LE，而在 13:00—14:00 期间出现过短暂的 LE 大于 H 的现象，分析认为可能是灌溉导致 LE 增加。拔节期和灌浆期白天 LE 显著大于 H，随着冬小麦旺盛生长，冠层覆盖度随之达到最大，作物蒸腾和土壤蒸发作用达到最强。灌浆期 LE 在 11:30 达到最大值 404.27 W·m^{-2}，而 H 最大值 185.37 W·m^{-2} 出现在 14:00。

土壤热通量(G)定义为土壤中温度分布不均匀所引起的热量传输，其与能量平衡方程(2)中的其他能量分量相比较小，且在较长的时间段内收支基本平衡[32]。从图 1 可看出，冬小麦 4 个生育期内夜间 G 均为负值，此时热量从土壤深层向地表传输。白天 G 为正值，热量从地表面向土壤深层传输。G 的变化幅度由大到小为：拔节期>灌浆期>出苗期>越冬期。G 的最大值一般出现在 14:00—15:00，相比于净辐射其到达峰值的时间要滞后 1~2 h，且拔节期和灌浆期非常明显，分析原因为土壤比热容不同于空气，吸收净辐射能后在土壤间传输需要一定时间。G 在拔节期达到整个生育期内的最大值，为 53.20 W·m^{-2}。

2.1.2 能量通量年变化特征

图 2 为 2013—2014 年度冬小麦整个生育时期净辐射和各能量分量的年变化趋势。可以看出，冬小麦 6 月份收割之前，净辐射(R_n)和潜热通量(LE)的变化趋势较为一致，且两者的观测值相差不大，都是越冬期达到最低值。R_n 年最低平均值为 114.51 W·m^{-2}，LE

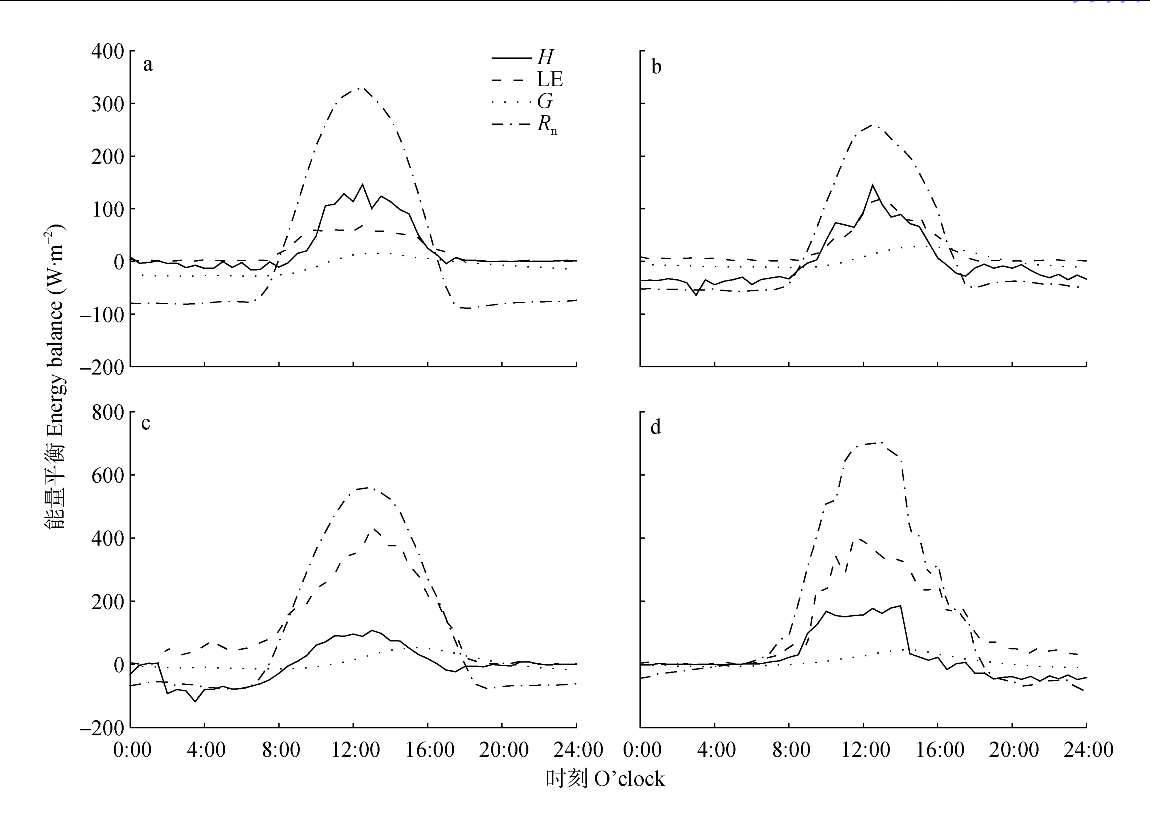


图 1　出苗期(10 月 25 日, a)、越冬期(1 月 25 日, b)、拔节期(4 月 5 日, c)和灌浆期(5 月 25 日, d)冬小麦农田能量通量的日变化

Fig. 1　Diurnal variations of energy flux of winter wheat farmland in October 25 at seeding stage (a), January 25 at overwintering stage (b), April 5 at jointing stage (c) and May 25 at grain-filling stage (d)

H: 显热通量; LE: 潜热通量; *G*: 土壤热通量; R_n: 净辐射。*H*: sensible heat flux; LE: latent heat flux; *G*: soil heat flux; R_n: net radiation.

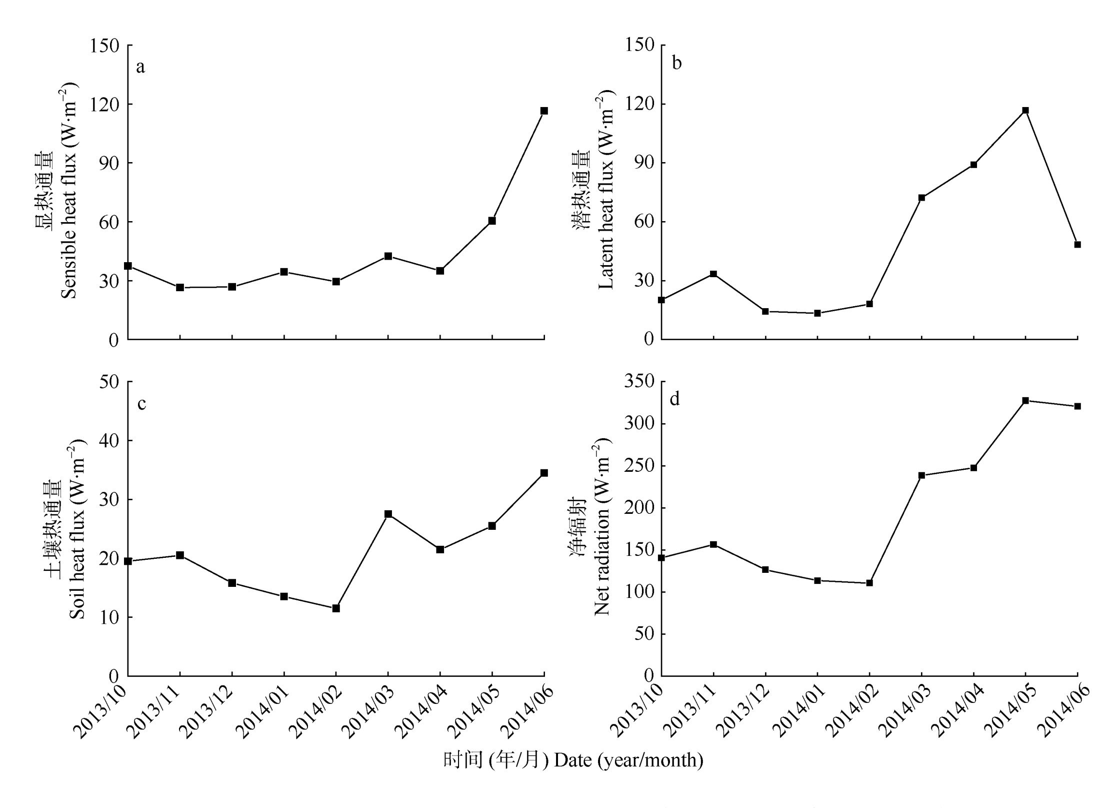


图 2　冬小麦农田显热通量(a)、潜热通量(b)、土壤热通量(c)和净辐射(d)的年变化

Fig. 2　Annual variations of sensible heat flux (a), latent heat flux (b), soil heat flux (c) and net radiation (d) of winter wheat farmland

的年最低平均值为 13.47 W·m^{-2}，而此时的显热通量(H)观测值较大。进入越冬期后，H 最大值为 33.61 W·m^{-2}，土壤热通量(G)为 13.05 W·m^{-2}，H 和 G 在有效能量中的占比分别为 26.59%和 10.32%。分析原因为：冬季太阳辐射较弱，冬小麦植被覆盖度较低，农田有较大面积裸露的土壤，且有时下垫面会有积雪覆盖，这样造成地面反射率比其他生育期大，有效能量较大部分用来加热大气和植被。因此，R_n 和 LE 偏小，H 偏大。H 和 G 月平均值表现为越冬期正值时间最短，灌浆期和成熟期最长；LE 在整个生育期内全天基本为正值。

冬小麦在越冬期之后，R_n 和 LE 观测值开始增大，因为随太阳入射角增大，白昼变长且气温增高，冬小麦开始快速生长，冠层覆盖度增大，植被蒸腾和土壤蒸发作用变得强烈。冬小麦在越冬期后进入返青拔节期后，H 和 LE 整体呈负相关关系，LE 观测值在 5 月份达到最大值 116.56 W·m^{-2}，R_n 为 327.02 W·m^{-2}，LE 占有效能量为 35.64%；H 和 G 在有效能量中的占比小，分别为 20.01%和 7.87%。

6 月份以后，冬小麦成熟并收割，R_n 与 5 月份相比下降，为 317.79 W·m^{-2}，其原因可能是 6 月份降雨量较大，阴雨天气导致 R_n 月平均值降低。LE 在 6 月份呈下降趋势，为 49.11 W·m^{-2}，分析其原因为冬小麦收割之后，植被冠层覆盖度急剧降低，植被蒸腾作用下降，LE 主要为土壤水分蒸发耗热值。H 在 6 月增长迅速，达到整个生育期最大值 128.12 W·m^{-2}，G 为 34.05 W·m^{-2}。冬小麦收割之后，地表大部分为裸露的土壤，有效能量大部分用来加热大气和土壤。

2.2 冬小麦农田生态系统的能量闭合分析

判别涡度相关观测数据可靠性的主要方法是能量平衡法，即计算系统的能量平衡比率。本文在不考虑昼夜能量平衡差异的情况下，将冬小麦出苗期、越冬期、拔节期和灌浆期观测日期内显热通量与潜热通量之和(H+LE)与可利用能量(R_n–G)进行闭合。由图 3 可看出，4 个生育时期的回归直线斜率分别为 0.49、0.77、0.81 和 0.76，相关系数分别为 0.91、0.92、0.96 和 0.97。这表明冬小麦 4 个生育时期内能量闭合情况良好，优于国内其他学者的冬小麦研究结果[33-35]，以及王春林等[36]、岳平等[37]、娄善伟等[38]在不同下垫面的研究结果，这说明华北平原冬小麦农田生态系统涡度相关系统观测通量数据是可靠的。

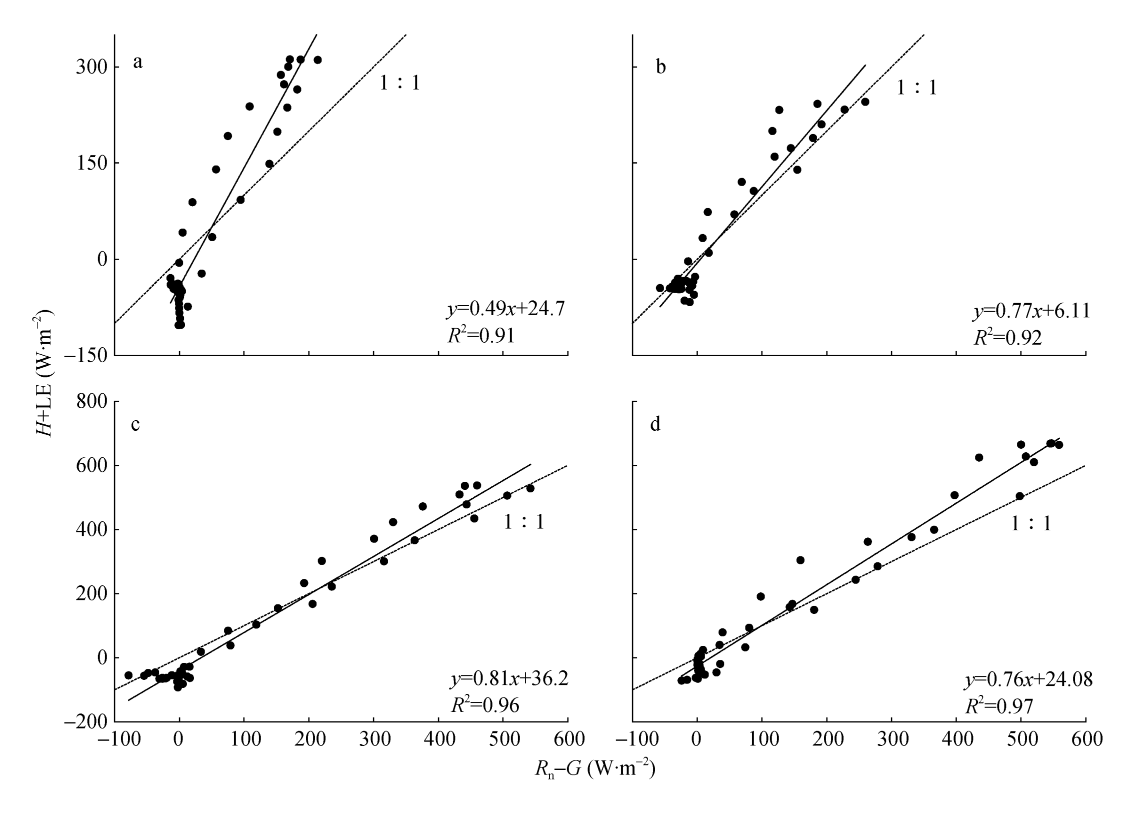


图 3 冬小麦出苗期(10 月 25 日, a)、越冬期(1 月 25 日, b)、拔节期(4 月 5 日, c)和灌浆期(5 月 25 日, d)农田能量闭合

Fig. 3 Energy closure of winter wheat farmland in October 25 at seeding stage (a), January 25 at overwintering stage (b), April 5 at jointing stage (c) and May 25 at grain-filling stage (d)

H: 显热通量; LE: 潜热通量; G: 土壤热通量; R_n: 净辐射。H: sensible heat flux; LE: latent heat flux; G: soil heat flux; R_n: net radiation.

2.3　冬小麦农田生态系统的波文比分析

由图 4 可以看出, 冬小麦的出苗期、越冬期、拔节期和灌浆期典型日期的波文比变化趋势均呈倒“U”型。白天波文比值相对稳定, 变化趋势不大。主要原因为白天无风或微风条件下, 温度和湿度梯度不受水平气流的影响, 大气处于正温、正湿的状态, 这时波文比的计算值较为精确。在夜晚大气层结稳定条件下, 波文比为负值, 且变化幅度较大, 异常值较多。4 个生育时期内典型日期的波文比日变化趋势均在凌晨或傍晚波动较大, 此时潜热通量(LE)和显热通量(H)异常波动, 有效能量计算的误差会引起通量计算较大误差, 这与刘树华等[39]和王旭等[40]的研究结果一致。

波文比受日出日落时间、净辐射(R_n)能量和极端天气(降雨和大风)等的影响。出苗期(图 4a)波文比从 9:00 开始变为正值, 表示 H 方向为由大气向下垫面传输; 14:00 达到最大值 2.12, 此时 H 占 R_n 的比例最大; 19:00 以后波文比为负值, 表示 H 方向为由下垫面向大气传输。越冬期(图 4b)波文比在 10:00 变为正值, 分析原因为越冬期日出时间较晚, R_n 能量较小; 11:00 达到最大值 1.48; 17:00 后波文比变为负值。这与越冬期 H 日变化趋势一致。拔节期(图 4c)9:00 波文比开始变为正值, 11:00 达到最大值 0.31, 分析原因为随着冬小麦的生长发育, 其植被覆盖度显著增大, LE 占 R_n 比例较大, H 日均值小于潜热通量 LE, 这与拔节期各能量分量的日变化趋势一致。灌浆期(图 4d)7:00 波文比变为正值, 此时日出时间较早, R_n 能量达到一年中最大值; 波文比在 9:00 达到最大值 0.58, 此时 H 占 R_n 的比例为一天中最大值, 这与灌浆期 H 的变化趋势一致。

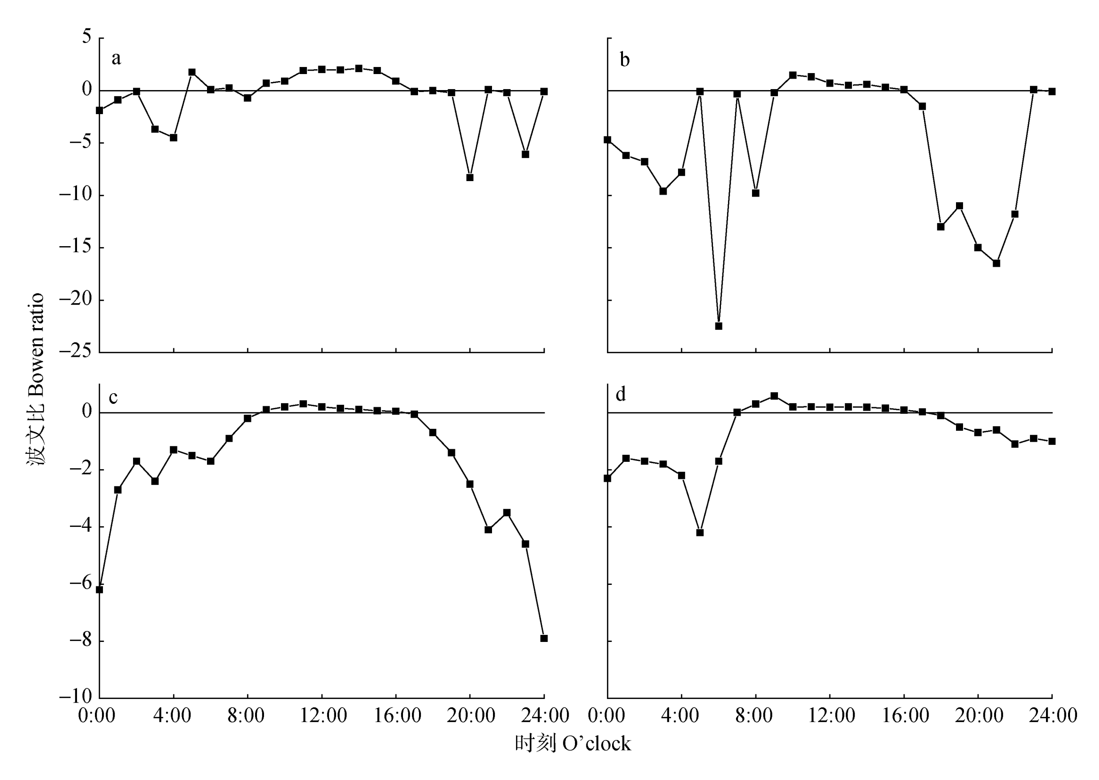


图 4　冬小麦出苗期(10 月 25 日, a)、越冬期(1 月 25 日, b)、拔节期(4 月 5 日, c)和灌浆期(5 月 25 日, d)波文比值

Fig. 4　Bowen ratio of winter wheat farmland in October 25 at seeding stage (a), January 25 at overwintering stage (b), April 5 at jointing stage (c) and May 25 at grain-filling stage (d)

3　讨论与结论

长久以来, 能量不闭合现象普遍存在于各种生态系统通量观测中, 平均不闭合率为 20%[24-25,41]。涡度相关法观测的基本假设是下垫面均一, 气流水平均匀的近地面层。刘渡等[35]的研究表明, 华北平原冬小麦/夏玉米轮作田的能量闭合率存在明显的季节特征。在本试验中, 冬小麦出苗期、越冬期、拔节期和灌浆期的能量闭合度分别为 0.48、0.73、0.83 和 0.76, 出苗期能量闭合度较小, 拔节期能量闭合率相对较大。这与 Wilson 等[24]认为生长季能量闭合状况优于非生长季的研究相一致。在冬小麦整个生育时期尺度上, 拔节期能量闭合率 0.83 为最高, 这与田红等[42]对麦稻轮作田和童应祥等[43]对冬小麦的研究结果相类似。从冬小麦出苗期到拔节期, 能量闭合率不断升高, 这与李正泉等[25]对 ChinaFLUX 各站点的能量闭合程度研究相一致, 即夏季能量闭合

程度较好，从冬季到夏季不断提高。本试验中冬小麦能量闭合度最大值为 0.83，和李祎君等[32]在锦州玉米农田生态系统，郭建侠等[44]在华北平原玉米生态系统以及 Twine 等[41]和 Wilson 等[24]的研究结果一致。

根据已有的研究[40]，并结合观测站点的实际情况，能量不闭合的原因可以总结为如下几个方面：1)涡度仪器的系统偏差：仪器的不准确标定、数据处理的不正确以及极端天气对仪器的观测影响都会影响能量闭合度。因此对涡度仪器的定时标定，及时处理机械故障才能减少系统误差。2)观测源区尺度不匹配：由于涡度相关观测的通量源区与净辐射仪、土壤热通量板的观测源区尺度不一致，导致湍流通量与有效能量之比降低，影响涡度相关观测的能量闭合率。3)其他能量余项的忽略：在生态系统能量收支中，冠层热储量和其他来源能量被忽略，这是能量不闭合的一个重要原因。而在田红等[42]的研究中，裸地的能量闭合率(EBR)比麦地、稻田的高，说明即使作物冠层高度在 1 m 以内，仍有少许冠层热储量。4)未考虑土壤表层热储量：本文研究中，土壤热通量的计算并未考虑土壤表层的热储量值。

在许多复杂的条件下，如异质性下垫面和稳定大气层结等，能量闭合率通常较低。而近年来通量“面积平均”概念和简化处理方法的提出，对能量平衡和闭合研究具有较大的指导意义。大涡模拟(LES)在具体应用到边界层大气湍流研究时，仍有较多的限制[22]。在今后的研究中，通过开发新的观测数据处理方法，从而得到通量的面积平均或更有空间代表性的结果，将会是解决涡度相关观测能量平衡闭合问题的有效途径。

本研究基于2013—2014年度的涡度相关系统和全要素自动气象站数据，分析华北平原典型冬小麦农田生态系统水热通量的日变化和年变化特征，并分析了冬小麦 4 个生育时期代表性日期的能量闭合，计算了冬小麦 4 个代表性日期的波文比值。结果表明：1)日变化尺度上，不同生育时期内净辐射和各能量分量的日变化均为单峰二次曲线，且与日照时数和日照强度有相关关系。净辐射、显热通量和潜热通量的峰值出现在 12:00—13:00；土壤热通量的峰值出现在 14:00—15:00，相比于净辐射其到达峰值的时间要滞后 1~2 h。2)年变化尺度上，净辐射和潜热通量在越冬期达到最低值，分别为 114.51 W·m^{-2}和 13.47 W·m^{-2}，而显热通量达到最大值 33.61 W·m^{-2}，土壤热通量为 13.05 W·m^{-2}。净辐射和潜热通量在拔节期达到最大值，分别为 327.02 W·m^{-2}和 116.56 W·m^{-2}。净辐射和潜热通量的变化趋势较为一致，显热通量和土壤热通量变化趋势一致。3)冬小麦出苗期能量闭合率较低，越冬期、拔节期和灌浆期能量闭合率较好，平均能量闭合率为 0.7，与国内外其他学者的研究结果一致。越冬期波文比在 14:00 达到最大值 2.12，越冬期、拔节期和灌浆期在 10:00 左右达到最大值。本文的定量化结果，可以为研究华北平原农田生态系统水热通量等研究提供依据。

参考文献 References

[1] 王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从 HEIFE 到 IMGRASS 和 GAME-TIBET/TIPEX[J]. 高原气象, 1999, 18(3): 280–294
Wang J M. Land surface process experiments and interaction study in China — From HEIFE to IMGRASS and GAME-TIBET/TIPEX[J]. Plateau Meteorology, 1999, 18(3): 280–294

[2] Dennison M S, Berry J F. Wetlands: Guide to Science, Law, and Technology[M]. New Jersey: Cambridge University Press, 1993: 24–27

[3] Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Rosenzweig C, et al. Evapotranspiration models with canopy resistance for use in climate models, a review[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 54(2/4): 373–388

[4] Unland H E, Houser P R, Shuttleworth W J, et al. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran desert site[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 82(1/4): 119–153

[5] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future[J]. Global Change Biology, 2003, 9(4): 479–492

[6] 张永强, 沈彦俊, 刘昌明, 等. 华北平原典型农田水、热与 CO_2 通量的测定[J]. 地理学报, 2002, 57(3): 333–342
Zhang Y Q, Shen Y J, Liu C M, et al. Measurement and analysis of water, heat and CO_2 flux from a farmland in the North China Plain[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(3): 333–342

[7] 黄妙芬. 地表通量研究进展[J]. 干旱区地理, 2003, 26(2): 159–165
Huang M F. Advance of research on surface flux[J]. Arid Land Geography, 2003, 26(2): 159–165

[8] Kosugi Y, Katsuyama M. Evapotranspiration over a Japanese cypress forest Ⅱ Comparison of the eddy covariance and water budget methods[J]. Journal of Hydrology, 2007, 334(3/4): 305–311

[9] Matsumoto K, Ohta T, Nakai T, et al. Energy consumption and evapotranspiration at several boreal and temperate forests in the Far East[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(12): 1978–1989

[10] 王文杰, 于景华, 毛子军, 等. 森林生态系统 CO_2 通量的研

究方法及研究进展[J]. 生态学杂志, 2003, 22(5): 102–107
Wang W J, Yu J H, Mao Z J, et al. Study method and research advance in forest CO_2 flux[J]. Chinese Journal of Ecology, 2003, 22(5): 102–107
[11] 赵晓松, 关德新, 吴家兵, 等. 长白山阔叶红松林 CO_2 通量与温度的关系[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1088–1095
Zhao X S, Guan D X, Wu J B, et al. The relationship between CO_2 flux and temperature of the mixed forest of broad-leaved and Korean-pine in Changbai Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 1088–1095
[12] 耿元波, 董云社, 齐玉春. 草地生态系统碳循环研究评述[J]. 地理科学进展, 2004, 23(3): 74–81
Geng Y B, Dong Y S, Qi Y C. Review about the carbon cycle researches in grassland ecosystem[J]. Progress in Geography, 2004, 23(3): 74–81
[13] Oishi A C, Oren R, Stoy P C. Estimating components of forest evapotranspiration: A footprint approach for scaling sap flux measurements[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(11): 1719–1732
[14] 朱咏莉, 吴金水, 胡晶亮, 等. 亚热带稻田能量平衡闭合状况分析[J]. 中国农学通报, 2007, 23(8): 536–539
Zhu Y L, Wu J S, Hu J L, et al. Energy balance closure at rice paddy fields in subtropical region[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(8): 536–539
[15] 贾志军, 张稳, 黄耀. 三江平原稻田能量通量研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 820–826
Jia Z J, Zhang W, Huang Y. Analysis of energy flux in rice paddy in the Sanjiang Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 820–826
[16] 王尚明, 胡继超, 吴高学, 等. 亚热带稻田生态系统 CO_2 通量特征分析[J]. 环境科学学报, 2011, 31(1): 217–224
Wang S M, Hu J C, Wu G X, et al. Characteristic analysis of CO_2 fluxes from a rice paddy ecosystem in a subtropical region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(1): 217–224
[17] 徐昔保, 杨桂山, 孙小祥. 太湖流域典型稻麦轮作农田生态系统碳交换及影响因素[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6655–6665
Xu X B, Yang G S, Sun X X. Analysis of net ecosystem CO_2 exchange (NEE) in the rice-wheat rotation agroecosystem of the Lake Taihu Basin, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): 6655–6665
[18] 朱明佳, 赵谦益, 刘绍民, 等. 农田下垫面观测通量的变化特征及其气候学足迹分析[J]. 地球科学进展, 2013, 28(12): 1313–1325
Zhu M J, Zhao Q Y, Liu S M, et al. Analysis of the characteristics of turbulent flux and its footprint climatology at an agricultural site[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(12): 1313–1325
[19] 郭家选, 梅旭荣, 林琪, 等. 冬小麦农田暂时水分胁迫状况下水、热通量日变化[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 130–137
Guo J X, Mei X R, Lin Q, et al. Diurnal variation of water and heat flux under transient water stress in a winter wheat field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1): 130–137
[20] Liu H P, Foken T. A modified Bowen ratio method to determine sensible and latent heat fluxes[J]. Meteorologische Zeitschrift, 2001, 10(1): 71–80
[21] Foken T. The energy balance closure problem: An overview[J]. Ecological Applications, 2008, 18(6): 1351–1367
[22] 王介民, 王维真, 刘绍民, 等. 近地层能量平衡闭合问题——综述及个例分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 705–713
Wang J M, Wang W Z, Liu S M, et al. The problems of surface energy balance closure — An overview and case study[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(7): 705–713
[23] 徐自为, 刘绍民, 徐同仁, 等. 不同土壤热通量测算方法的比较及其对地表能量平衡闭合影响的研究[J]. 地球科学进展, 2013, 28(8): 875–889
Xu Z W, Liu S M, Xu T R, et al. The observation and calculation method of soil heat flux and its impact on the energy balance closure[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(8): 875–889
[24] Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113(1/4): 223–243
[25] 李正泉, 于贵瑞, 温学发, 等. 中国通量观测网络(ChinaFLUX)能量平衡闭合状况的评价[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(S2): 46–56
Li Z Q, Yu G R, Wen X F, et al. Energy balance closure at ChinaFLUX sites[J]. Science in China Series D Earth Sciences, 2004, 34(S2): 46–56
[26] 孙叶林, 刘勤. 黄淮海平原封丘县土壤肥力变异与农田生产力相关研究[J]. 土壤, 2009, 41(2): 274–277
Sun Y L, Liu Q. Soil fertilities and its relationship to maize productivity in the North China Plain[J]. Soils, 2009, 41(2): 274–277
[27] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for long term energy flux data sets[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(1): 71–77
[28] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(1): 43–69
[29] 吴家兵, 关德新, 张弥, 等. 涡动相关法与波文比-能量平衡法测算森林蒸散的比较研究——以长白山阔叶红松林为例[J]. 生态学杂志, 2005, 24(10): 1245–1249
Wu J B, Guan D X, Zhang M, et al. Comparison of eddy covariance and BREB methods in determining forest evapotranspiration — Case study on broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(10): 1245–1249
[30] Perez P J, Castellvi F, Ibañez M, et al. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 97(3): 141–150
[31] 陈云飞, 江洪, 周国模, 等. 高效经营雷竹林生态系统能量通量过程及闭合度[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1063–1069
Chen Y F, Jiang H, Zhou G M, et al. Energy flux and energy balance closure of intensively managed Lei bamboo forest ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(4): 1063–1069
[32] 李祎君, 许振柱, 王云龙, 等. 玉米农田水热通量动态与能量闭合分析[J]. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1132–1144

Li Y J, Xu Z Z, Wang Y L, et al. Latent and sensible heat fluxes and energy balance in a maize agroecosystem[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(6): 1132–1144
[33] 高红贝, 邵明安. 黑河中游绿洲春小麦生育期农田热储通量分析[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(5): 33–40
Gao H B, Shao M A. Heat storage fluxes of spring wheat during growth periods in the oasis farmland in Heihe Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(5): 33–40
[34] 刘渡, 李俊, 同小娟, 等. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作田能量闭合状况分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 493–499
Liu D, Li J, Tong X J, et al. Analysis of the energy balance closure in a winter wheat/summer maize double cropping system in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(4): 493–499
[35] 刘渡, 李俊, 于强, 等. 涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5309–5317
Liu D, Li J, Yu Q, et al. Energy balance closure and its effects on evapotranspiration measurements with the eddy covariance technique in a cropland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5309–5317
[36] 王春林, 周国逸, 王旭, 等. 鼎湖山针阔叶混交林生态系统能量平衡分析[J]. 热带气象学报, 2007, 23(6): 643–651
Wang C L, Zhou G Y, Wang X, et al. Energy balance analysis of the coniferous and broad-leaved mixed forest ecosystem in Dinghushan[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2007, 23(6): 643–651
[37] 岳平, 张强, 杨金虎, 等. 黄土高原半干旱草地地表能量通量及闭合率[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6866–6876
Yue P, Zhang Q, Yang J H, et al. Surface heat flux and energy budget for semi-arid grassland on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(22): 6866–6876
[38] 娄善伟, 饶翠婷, 赵强, 等. 不同种植密度下的棉田小气候特点[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2): 255–260
Lou S W, Rao C T, Zhao Q, et al. Micro-climate characteristics of cotton field under different plant density[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(2): 255–260
[39] 刘树华, 茅宇豪, 胡非, 等. 不同下垫面湍流通量计算方法的比较研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(3): 616–629
Liu S H, Mao Y H, Hu F, et al. A comparative study of computing methods of turbulent fluxes on different underling surfaces[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(3): 616–629
[40] 王旭, 尹光彩, 周国逸, 等. 鼎湖山针阔混交林旱季能量平衡研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2005, 13(3): 205–210
Wang X, Yin G C, Zhou G Y, et al. Dry season energy balance of a coniferous and broad-leaved mixed forest at Dinghushan Mountain, Southern China[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2005, 13(3): 205–210
[41] Twine T E, Kustas W P, Norman J M, et al. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 103(3): 279–300
[42] 田红, 伍琼, 童应祥. 安徽省寿县农田能量平衡评价[J]. 应用气象学报, 2011, 22(3): 356–361
Tian H, Wu Q, Tong Y X. Evaluation on energy balance of farmland in Shouxian County of Anhui Province[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 22(3): 356–361
[43] 童应祥, 田红. 寿县地区麦田能量平衡闭合状况分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(18): 384–387
Tong Y X, Tian H. Analysis of energy balance closure of Shouxian wheat field[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(18): 384–387
[44] 郭建侠, 卞林根, 戴永久. 玉米生育期地表能量平衡的多时间尺度特征分析及不平衡原因的探索[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(9): 1103–1111
Guo J X, Bian L G, Dai Y J. Multiple time scale evaluation of the energy balance during the maize growing season, and a new reason for energy imbalance[J]. Sciences in China Series D Earth Sciences, 2008, 38(9): 1103–1111